

## Исследование эволюции наноструктуры СВМПЭ при нагреве методами ШУРР/МУРР

Статник Е.С.<sup>1,2,3</sup>, Горшкова Ю.Е.<sup>4</sup>, Жеребцов Д.Д.<sup>2</sup>, Садыкова Ю.А.<sup>1</sup>, Салимон А.И.<sup>1,2,3</sup>,  
Корсунский А.М.<sup>1,2,3</sup>

1 – Сколтех, Москва, Россия

2 – НИТУ МИСИС, Москва

3 – МАИ, Москва, Россия

4 – ОИЯИ, Дубна, Россия

eugene.statnik@skoltech.ru

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) — высокоэффективный полимер, востребованный в биомедицине, робототехнике и производстве композитов [1]. Самоармированные композиты на его основе (САК-СВМПЭ), где и матрица, и армирующие волокна состоят из одного полимера, обладают уникальными физико-механическими свойствами за счет переплетения макромолекул на границе раздела [2]. Важным свойством таких материалов является эффект памяти формы (ЭПФ), механизм которого тесно связан с надмолекулярной структурой данного полимера.

В данной работе методами малоуглового (МУРР) и широкоугольного (ШУРР) рентгеновского рассеяния впервые проведено комплексное исследование температурной эволюции наноструктуры самоармированного композита на основе СВМПЭ, полученного методом горячего прессования (170 °С, 25 МПа, 10 мин) однонаправленно уложенных высокоориентированных волокон марки SGX Дунеета® [3]. Эксперимент проводился на станции рентгеновского рассеяния XEUSS 3.0 на расстояниях 50 мм (ШУРР) и 900 мм (МУРР) посредством *in situ* нагрева в диапазоне 23–140 °С с шагом 20 °С с помощью термостоллика Linkam HFSX350 +RH. Для учета анизотропии структуры полученные диаграммы рассеяния (Рис. 1) раздельно интегрировались по секторам ( $\pm 30^\circ$ ) вдоль продольного (ось волокна) и поперечного направлений.

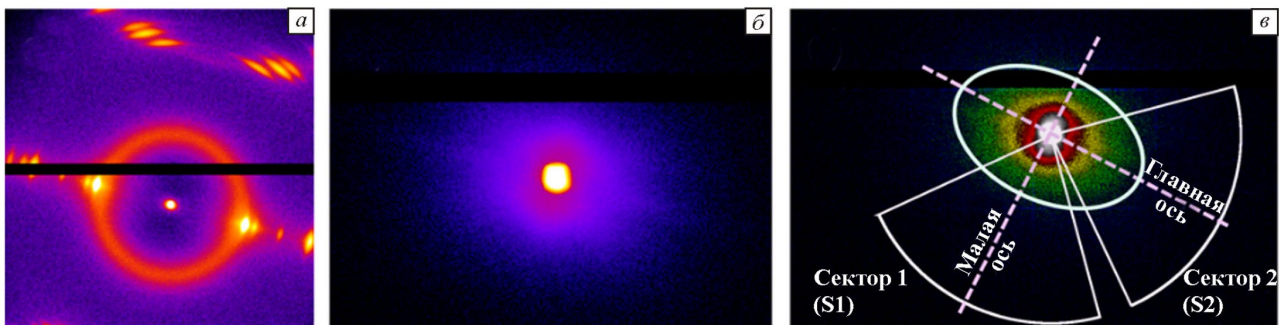


Рис. 1. Пример диаграмм рассеяния: (а) ШУРР, (б) МУРР. (в) Схема секторного интегрирования

Детальный анализ диаграмм МУРР с использованием обобщенной модели Гинье-Порода [6] показал принципиальную разницу в поведении материала вдоль разных направлений. В поперечном направлении радиус инерции вращения и размерный фактор изменялись незначительно — первый возрстал с 3.0 до 3.4 нм в течение всего температурного диапазона. Напротив, вдоль направления ориентации волокон наблюдался скачкообразный рост радиуса

## СД-II-26

инерции вращения примерно в 1.5 раза (с 3.4 до 5.1 нм) и увеличение размерного фактора на 10 % (с 2.6 до 2.9), начинавшийся с температуры  $\sim 80$  °С, что соответствует известному температурному порогу активации ЭПФ в СВМПЭ [4,5].

Последующий анализ диаграмм ШУРР и одномерной корреляционной функции подтвердил, что кристаллические домены остаются структурно стабильными — размер кристаллитов и их коэффициент теплового расширения остаются практически постоянными в течение всего процесса нагрева. В то же время коэффициент теплового расширения аморфной фазы оказался на порядок выше и достигал максимальных значений именно вдоль направления ориентации макромолекул.

Таким образом, комбинированный анализ диаграмм ШУРР/МУРР позволил установить, что ЭПФ в САК-СВМПЭ реализуется преимущественно за счет направленной перестройки аморфной фазы вдоль ориентации волокон, в то время как кристаллическая фаза остается стабильной и выполняет роль «якорей», запоминающих исходную форму [6].

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 21–73–20205.

### Литература:

- [1] Kurtz, S.M. // UHMWPE Handbook, 2009.
- [2] Capiati, N.J. and Porter, R.S. // The Concept of One Polymer Composites Modelled with High Density Polyethylene, J. Mater. Sci., 1975, vol. 10(10), pp. 1671–1677.
- [3] Zherebtsov, D.D., Chukov, D.I., Torokhov, V., and Statnik, E.S., Manufacturing of Single-Polymer Composite Materials Based on Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Fibers by Hot Compaction, J. Mater. Eng. Performance, 2020, vol. 29(3), pp. 1522–1527.
- [4] Maksimkin, A.V., Kaloshkin, S.D., Zadorozhnyy, M.Yu., and Tcherdyntsev, V.V., Comparison of Shape Memory Effect in UHMWPE for Bulk and Fiber State, J. Alloys Compd., 2014, vol. 586, pp. S214–S217.
- [5] Salimon, A.I., Senatov, F.S., Kalyaev, V., and Korsunsky, A.M., Shape Memory Polymer Blends and Composites for 3D and 4D Printing Applications, in 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials, Sadasivuni, K.K., Deshmukh, K., and Almaadeed, M.A., Eds., Elsevier, 2020, pp. 161–189.
- [6] Статник Е.С., Горшкова Ю.Е., Салимон А.И. и др. // Исследование эволюции наноструктуры при нагреве самоармированного сверхвысокомолекулярного полиэтилена методами широкоугольного и малоугольного рентгеновского рассеяния, Физическая мезомеханика, 28, 1, 2025, с. 22–31.